

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРИОПОРНЫХ ЗОНАХ

О.В. Кабанцев¹, К.О. Песин², А.В. Карлин²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, РОССИЯ

² ООО «МонолитСтройПроект», г. Москва, РОССИЯ

Аннотация: В статье рассматривается вопрос распределения напряжений в опорной зоне безригельного перекрытия при различных схемах поперечного сечения опорной конструкции. Выполнен детальный анализ численными методами напряженно-деформированного состояния опорной зоны безригельного перекрытия. Рассмотрены варианты моделей, сформированные как из пластинчатых, так и из объемных конечных элементов. Численными исследованиями установлены особенности формирования схемы деформирования приопорной зоны перекрытия. Получены схемы распределения нагрузок на контур опорной конструкции различного сечения. По результатам численного исследования установлено, что нормативная (традиционная) схема нагрузок на контур опоры соответствует сечению опорной конструкции, близкой к квадрату или прямоугольнику с соотношением сторон 1:2. Для вытянутых опорных контуров схема распределения нагрузок на контур опоры имеет существенные отличия от нормируемого. Установлено, что в торцевых зонах протяженных в плане опорных конструкций схема напряженно-деформированного состояния соответствует схеме НДС, формирующейся на квадратной (или близкой к квадрату) опорной конструкции. Разработаны предложения по учету особенностей НДС зоны опирания для расчета конструкции плиты по критерию продавливания.

Ключевые слова: моделирование, численные методы, расчетная модель, напряженно-деформированное состояние, железобетонные конструкции, продавливание

ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED CONCRETE PLATE AROUND SUPPORT ZONES

Oleg V. Kabantsev¹, Kirill O. Pesin², Alexey V. Karlin²

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

² "MonolitStroyProekt" LTD, Moscow, RUSSIA

Abstract: Structural analysis of the formation and evolution processes of structural microdestruction with the transition to macrorestriction occurring during plastic deformation of masonry under biaxial stresses. The dependencies that determine the amount of the plastic phase of the deformation of masonry. Identified processes and their corresponding strength criteria, which play a key role in the implementation phase of plastic deformation. It is shown that plastic deformation of masonry under biaxial stresses occurs when the physical line operation of the basic materials of masonry (brick and mortar). Found that the plastic properties of masonry under biaxial stresses are determined by the processes occurring at the nodes of contact interaction of brick and mortar in horizontal and vertical joints. According to the results of numerical studies the values of the coefficients of ductility of masonry at different variants of mechanical characteristics of brick, mortar and adhesive strength of their interaction.

Keywords: masonry, brick, mortar, modelling, numerical methods, calculation model, strain-stress state

1. ВВЕДЕНИЕ

Практика проектирования и строительства зданий и сооружений с несущей системой их монолитного железобетона показывает, что

для зданий гражданского назначения наиболее широко используются конструкции безригельного каркаса рамно-связевой конструктивной схемы. Для таких несущих систем наиболее ответственным конструктив-

ным элементом является узел стыка вертикальной несущей конструкции (колонны, пилона) с перекрытием. Широкое распространение получили бескапитальные виды стыка, применение которых позволяет получить конструкции с более высокими потребительскими качествами по отношению к конструкциям с капитальными стыками. Вместе с тем, бескапитальные стыки характеризуются более высокими уровнями напряжений, что (вследствие их конструктивных особенностей) требует особых методов для обеспечения их несущей способности – прежде всего по критерию продавливания.

Исследования явления продавливания железобетонных конструкций имеют более чем столетнюю историю. Так, в одной из первых отечественных книг по расчету и проектированию железобетонных конструкций [1] приведены указания по методам расчета и конструирования опорных узлов в безбалочных покрытиях, а также ряд конструктивных требований к размерам как опорных конструкций, так и приопорных зон железобетонных плит (стр.19-22). В начале XX века широко использовалась в практике проектирования железобетонных конструкций книга [2], в которой также приведены указания по расчету и конструированию опорных узлов перекрытий, где может реализовываться явление продавливания (стр. 524-525).

В исследованиях железобетонных конструкций, выполненных во второй половине и в конце XX века, проблема продавливания рассматривалась достаточно широко. Так, в работах А.С. Залесова [3, 4, 5], Н.И. Карпенко [6, 7] и зарубежных исследователей (см., например, [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]) рассматриваются различные аспекты явления продавливания железобетонных плит. Показано, что продавливание имеет весьма сложные механизмы, которые определяются не только (и не столько) работой бетонного тела конструкции, но и влиянием как продольного, так и поперечного армирования в приопорных зонах. Предложено несколько моделей

работы плит при продавливании (детальный анализ моделей представлен в [5]).

Вместе с тем, достаточно часто звучит мнение, что разрушение, которое рассматривается по механизму продавливания, представляет собой частный случай разрушения железобетонной конструкции по наклонному сечению. Однако, в работах [15, 16] показано, что такой подход является не вполне корректным. Таким образом, явление продавливания железобетонных плит требует специальных исследований, учитывающих особенности сложных механизмов, в нем реализующихся.

Детальный анализ исследований по проблеме продавливания показывает, что подавляющее большинство работ рассматривают разрушение по механизму продавливания с формированием **замкнутого вокруг опоры** (выделено авторами) контура разрушения с различными углами наклона граней к горизонтали. При этом форма продавливающего штампа (опорной поверхности плиты) принималась, как правило, круглой, квадратной или близкой к квадратной. К немногочисленным исследованиям иных форм опорных конструкций могут быть отнесены работы С.Ф. Клованича и В.И. Шеховцова, в рамках которых рассматриваются крестообразная и уголкового формы (результаты исследований представлены в монографии [17]). Но и в указанных исследованиях также рассматриваются схемы разрушения плит по контуру, замкнутому по периметру опоры.

В настоящее время в зданиях жилого назначения широкое распространение получает идея отказа от массового применения колонн квадратного или круглого сечения с более широким использованием вертикальных несущих конструкций в виде прямоугольных пилонов и фрагментов стен, что позволяет создать более удобные и комфортные (с позиций архитектора) объемно-планировочные решения. Так, стали массово применяться пилоны с соотношением сторон от 1:3 до 1:5 и более или простенки с длиной $L \geq 1,2$ м. Такие опорные конструкции не требуют (в соответ-

ствии с положениями действующих норм) проверок и проектирования опорных зон плит перекрытий по критерию продавливания. Вместе с тем, один из авторов был свидетелем разрушения приопорной зоны плиты перекрытия у торца протяженной в плане опоры (стены) со схемой разрушения, соответствующей механизму продавливания, что свидетельствует о необходимости анализа НДС таких приопорных участков перекрытий с позиций критериев продавливания. Таким образом, исследование работы плит перекрытия в приопорных зонах при различных вариантах сечения опорных конструкций является, несомненно, важной и актуальной задачей.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

При опирании плоских плит перекрытий на опорную конструкцию с сечением отличным от круглого, квадратного (близкой к квадрату) распределение напряжений в приопорной зоне, очевидно, будет иным по отношению к принятому в действующих нормах [18]. В монографии [19] показано, что принятая схема контура продавливания, который формируется **вокруг** опорной конструкции, является далеко не универсальной и при рассмотрении расчетного случая опирания перекрытия на крайнюю (угловую) колонну контур продавливания формируется на основе иных принципов.

При анализе НДС плит перекрытия в приопорных зонах следует учесть, что формирование касательных напряжений (τ) в толще плиты происходит не по линейным зависимостям от нагружающих конструкцию усилий. В связи с указанным представляется обоснованным исследовать НДС приопорных зон на основе анализа распределения нагрузок на контур опоры, что позволит выполнить сопоставление состояния плиты при различных вариантах сечений опорных конструкций, используя при этом физически линейную расчетную модель.

Исследование НДС приопорных зон плит перекрытия выполнено численными методами с использованием ВК SCAD [20].

Рассматривается опирание железобетонной плиты толщиной 200 мм перекрытия на следующие варианты сечения опорных конструкций при соотношении сторон $s:l$, где s – короткая сторона опоры (торец), l – длинная сторона опоры:

- **1** – соотношение сторон $s:l = 1:1$ (колонна 400x400);
- **2** – соотношение сторон $s:l = 1:2$ (пилон 400x800);
- **3** – соотношение сторон $s:l = 1:3$ (пилон 400x1200);
- **4** – соотношение сторон $s:l = 1:4$ (пилон 400x1600);
- **5** – соотношение сторон $s:l = 1:5$ (пилон 400x2000).

Качественно оценить схему НДС плитных конструкций в зонах формирования продавливания можно на основе схемы деформирования приопорных зон плит. Известно, что наиболее корректные результаты деформирования могут быть получены на основе моделей с использованием объемных конечных элементов (типа «солид») – расчетная модель, сформированная из КЭ указанного типа, представлена на рис. 1. В расчетной модели варьировались размеры поперечного сечения центральной опоры с исследованием НДС приопорной зоны перекрытия (зона k , рис. 1). Для исследования схем нагружения опорного контура по каждому из исследуемых вариантов опор разработаны модели на основе КЭ типа «оболочка» (по теории Рейснера-Миндлина) при этом для каждого варианта использованы различные сетки КЭ – от 400x400 мм до 25x25 мм (рис. 2).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наибольшее представление о схеме деформирования плиты с опиранием на пилон вытянутого типа дает схема деформирования по варианту **5** (рис. 3).

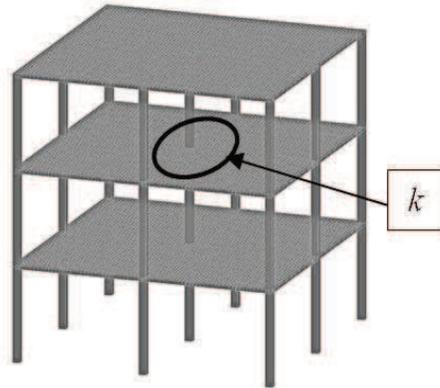
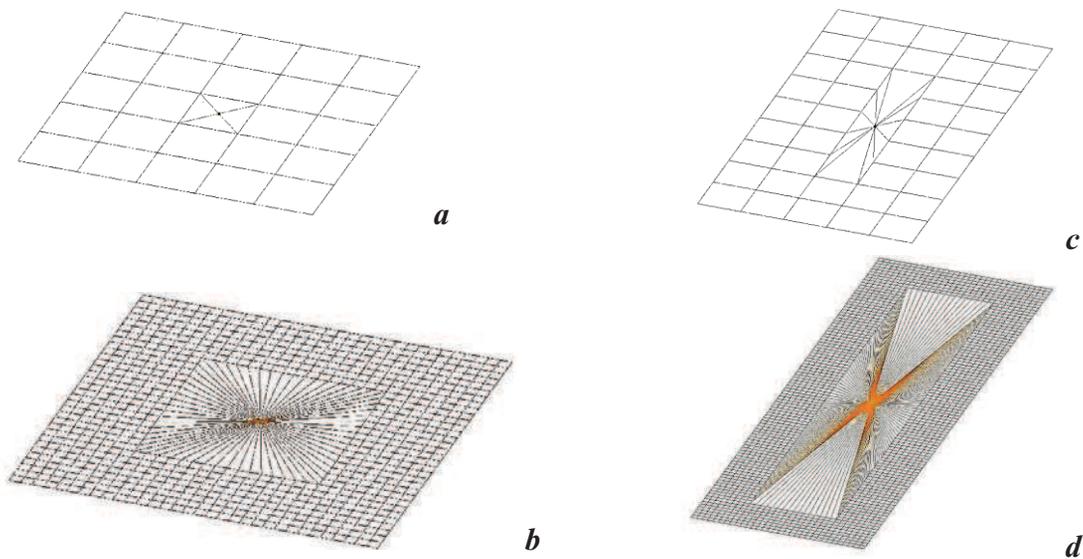
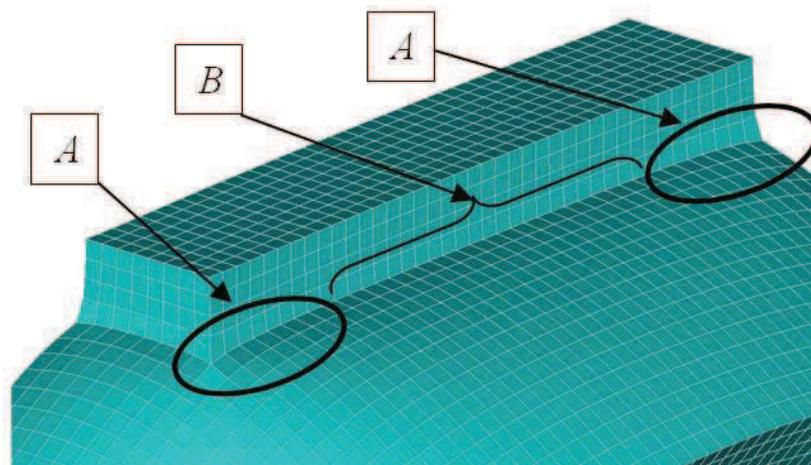


Рисунок 1. Расчетная модель железобетонного перекрытия с безригельным стыком перекрытия и колонны (пилона).



*Рисунок 2. Модели приопорных зон плит перекрытия - схемы сеток КЭ: **a** – опора с соотношением сторон $s:l = 1:1$, сетка 400x400 мм; **b** – то же, сетка 25x25 мм; **c** – опора с соотношением сторон $s:l = 1:5$, сетка 400x400 мм; **d** – то же, сетка 25x25 мм.*



*Рисунок 3. Схема деформирования приопорной зоны (зона **k** – рис. 1) плиты при опирании на пилон с соотношением сторон 1:5 (вариант 5).*

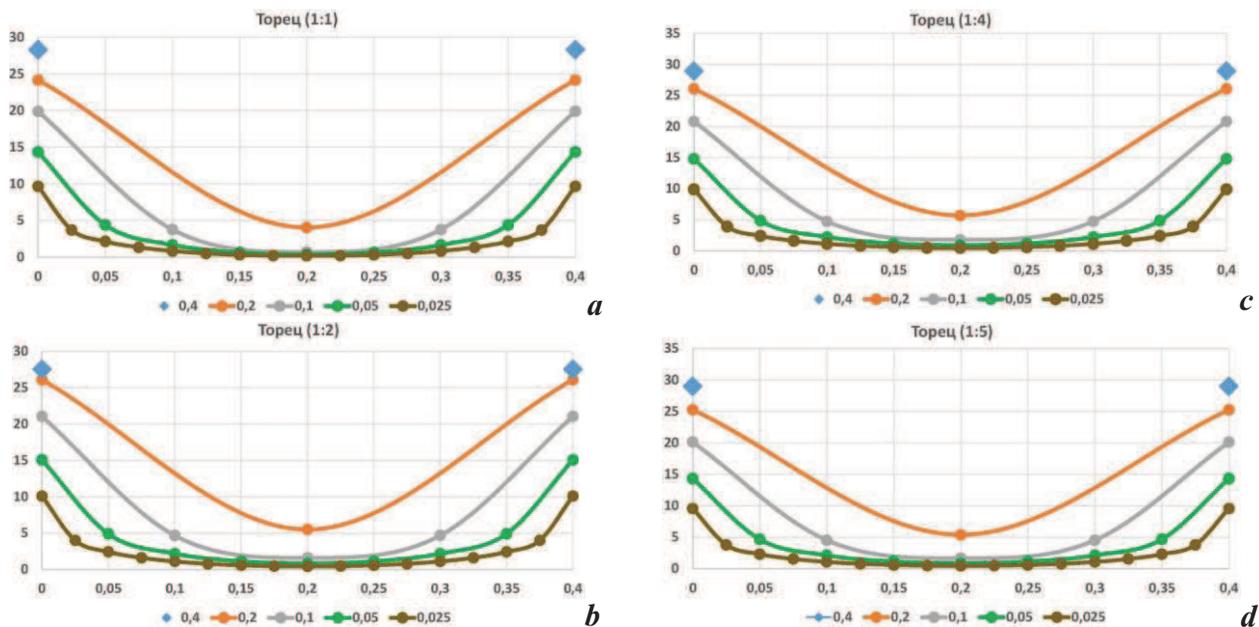


Рисунок 4. Распределение нагрузок по длине короткой (торцевой) стороны опорной зоны: **a** – опора с соотношением сторон $s:l = 1:1$; **b** – то же, соотношение сторон $s:l = 1:2$; **c** – то же, соотношение сторон $s:l = 1:4$; **d** – то же, соотношение сторон $s:l = 1:5$. Графики нагрузок приведены при различной сетке КЭ приопорной зоны перекрытия: 0,4; 0,2; 0,1; 0,05; 0,025 м.

Анализ схемы деформирования плиты при вытянутой в плане опорной конструкции позволяет выделить два типа участков приопорной зоны по длинной стороне опорного контура: участок **A** (приурочен к торцевой зоне) – наблюдается выраженное деформирование линии контакта КЭ плиты и КЭ опорной конструкции; участок **B** (средняя часть) – деформирование линии контакта не наблюдается. Графики распределения нагрузок по линии короткой стороны опоры (торец) имеет как общий характер, так и равные значения величин нагрузок в аналогичных точках (рис. 4). Графики распределения нагрузок на опорный контур по его длинной стороне (для соотношений сторон $s:l = 1:2; 1:3; 1:4$ и $1:5$) представлены на рис. 5. Схема распределения нагрузок по длинной стороне опорного контура соответствует схеме деформирования приопорной зоны плиты перекрытия, установленной в рамках численного эксперимента на моделях, сформированных из объемных КЭ (см. рис. 3): значимые нагрузки выявлены на

участках, прилегающих к торцам опор, на средней части длинной стороны опорного контура значения нагрузок близки к нулю. Полученное распределение нагрузок по длинной стороне вытянутой в плане опоры позволяет с большой степенью определенности утверждать, что применение традиционных методов расчета узла по критерию продавливания с равномерным распределением нагрузок по периметру опоры не соответствует реальному НДС плитной конструкции в приопорных зонах при вытянутых в плане опорах, начиная с соотношения сторон $s:l \geq 1:2$. При этом на участках длинной стороны опоры (**I**), примыкающих к торцам, наблюдается схема нагрузок, близкая к схеме нагрузок по короткой стороне (**s**).

Для детального рассмотрения зон опорного контура, прилегающих к торцу опоры, на рис. 6 представлены графики распределения нагрузок на фрагменты длинной стороны (**I**), примыкающие к торцу опоры, с длиной, равной длине короткой стороны, т.е. $l_I=s$.

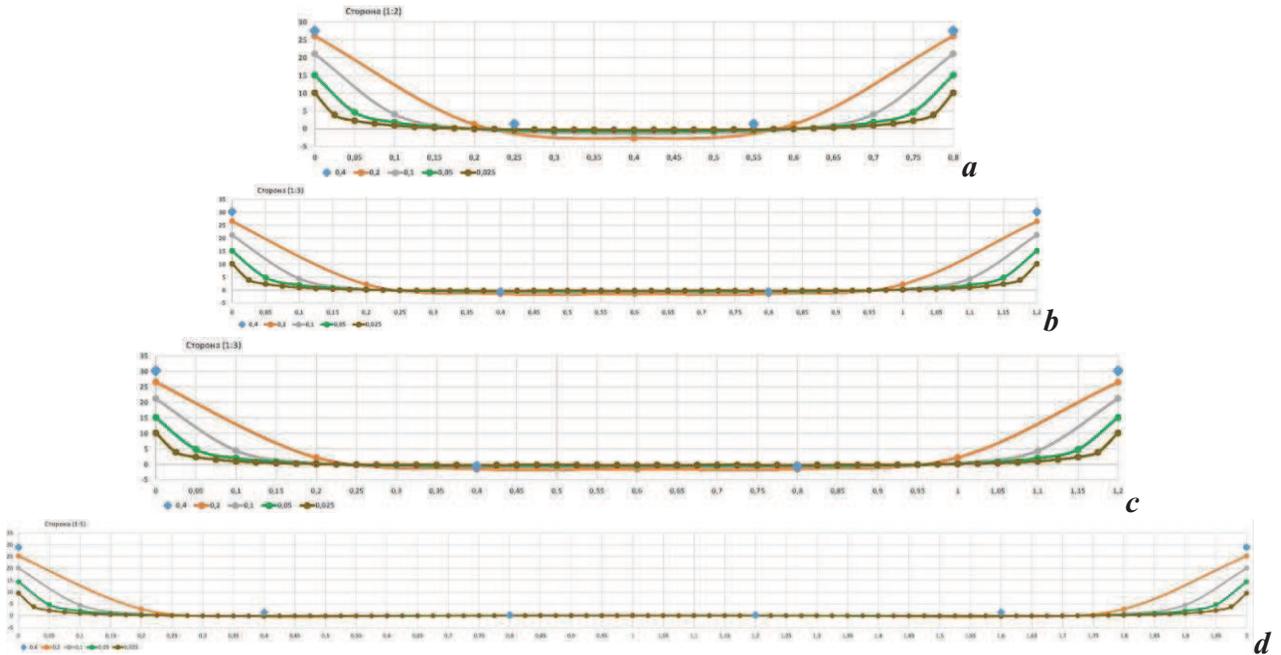


Рисунок 5. Распределение нагрузок по длинной стороне опорной зоны:
a – опора с соотношением сторон $s:l = 1:2$; **b** – то же, соотношение сторон $s:l = 1:3$;
c – то же, соотношение сторон $s:l = 1:4$; **d** – то же, соотношение сторон $s:l = 1:5$.
 Графики нагрузок приведены при различной сетке КЭ приопорной зоны перекрытия:
 0,4; 0,2; 0,1; 0,05; 0,025 м.

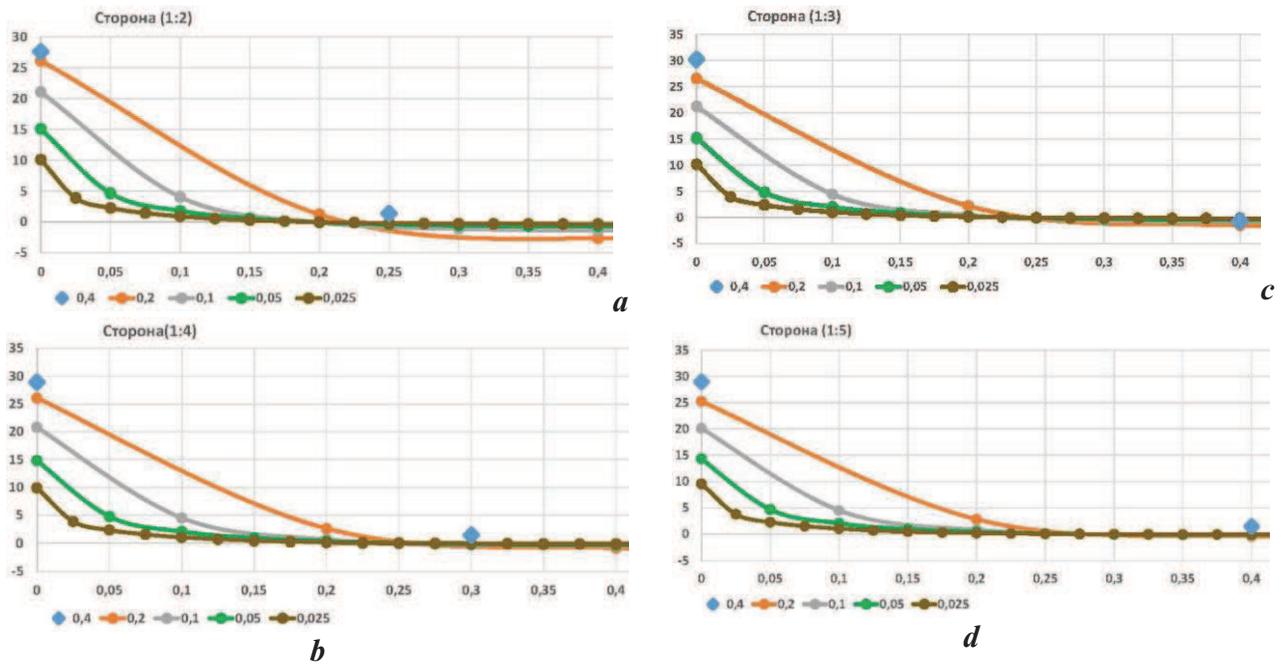


Рисунок 6. Распределение нагрузок по длинной стороне опорной зоны, прилегающей к торцу опоры:
a – опора с соотношением сторон $s:l = 1:2$; **b** – то же, соотношение сторон $s:l = 1:3$;
c – то же, соотношение сторон $s:l = 1:4$; **d** – то же, соотношение сторон $s:l = 1:5$.
 Графики нагрузок приведены при различной сетке КЭ приопорной зоны перекрытия:
 0,4; 0,2; 0,1; 0,05; 0,025 м.

Анализ нагрузок на зоны длинной стороны, примыкающие к торцам опор, показывает, что на участке $l_I' = 0,5s$ схемы распределения нагрузок и их величины полностью соответствуют нагрузкам на короткую сторону (торец) вытянутой опоры.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку схема нагрузок на краевой участок длинной стороны вытянутой в плане опоры, а также на торец полностью совпадает с аналогичной схемой по любой стороне квадратной в плане опоры, представляется возможным утверждать, что схема разрушения по механизму продавливания, установленная нормами для опор квадратной (или близкой к квадрату) формы, должна быть принята и для крайних зон протяженных опор.

Величина участка длинной стороны протяженной опоры, на котором следует учитывать возможность разрушения по механизму продавливания с выполнением соответствующих расчетных проверок, может быть принята равной $l_I' = 0,5s$.

Таким образом, численными исследованиями установлено, что разрушение по механизму продавливания может реализовываться на краевых зонах протяженных в плане опор плит перекрытий. Результаты исследований подтверждаются наблюдениями авторов статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лахтин Н.К., Кашкаров Н.А.** Железобетон. Часть III. Основания расчета железобетонных сооружений. – М.: Государственное техническое издательство, 1925. – 161 с.
2. **Залингер Р.** Железобетон. Его расчет и проектирование. – М.: – Л.: Государственное научно-техническое издательство, 1931. – 671 с.
3. **Залесов А.С., Ермуханов К.Е., Качановский С.Г.** Продавливание железобетонных плит. В кн. Исследования железобетонных конструкций при статических, повторных и динамических воздействиях. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1984, с. 17-22.
4. **Залесов А.С., Ермуханов К.Е., Момбеков И.А.** Прочность плит с поперечной арматурой на продавливание. // Бетон и железобетон, №6, 1990, с. 23-24.
5. **Залесов А.С.** Проектирование и расчет железобетонных монолитных зданий. – М.: 2010. – 279 с.
6. **Карпенко Н.И., Карпенко С.Н.** Практическая методика расчета железобетонных плит на продавливание по различным схемам. // Бетон и железобетон, №5, 2012, с. 10-16.
7. **Карпенко Н.И., Карпенко С.Н.** К построению общей методики расчета железобетонных плит на продавливание с учетом влияния моментов. // Вестник МГСУ, №3, т. 2, 2011, с. 86-91.
8. **Menetrey P.** Numerical Analysis of Punching Failure in Reinforced Concrete Structures. // Lausanne, EPFL, 1994, 178 pages.
9. **Hueste M.B.D., Browning J., Lepege A., Wallace J.W.** Seismic Design Criteria for Slab-Column Connections. // ACI Structural Journal. 2007-08. Title no 104-S43. Pp. 448-458.
10. **Muttoni A.** Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. // ACI Structural Journal. 2008-08. Title no 105-S42, pp. 440-450.
11. **Vompa D.V., Onet T.** An Incursion in Punching of Reinforced Concrete Flat Slabs. // Universitatea Tehnica "Gheorghe Asachi" din Iasi Tomul LV (LIX), Fasc. 2, 2009.
12. **Sacramento P.V.P., Federreira M.P., Oliveira D.R.C., Melo G.S.S.A.** Punching Strength of Reinforced Concrete Flat Slabs Without Shear Reinforcement. //

- Ibracon Structures and Materials Journal. Volume 5, Number 5 (October 2012) p. 659-691. ISSN 1983-4195.
13. **Zhang X.** Punching Shear Failure Analysis of Reinforced Concrete Flat Plates Using Simplified Ust Failure Criterion. // School of Engineering Faculty of Engineering and Information Technology. 2002. December, 141 pages.
 14. **Tian Y.** Behavior and Modeling of Reinforced Concrete Slabs-Column Connections (Dissertation Doctor of Philosophy // The University of Texas at Austin May 2007.
 15. **Гвоздев А.А., Залесов А.С., Ермуханов К.Е.** Переходные формы между разрушением по наклонному сечению и продавливанием. // Бетон и железобетон, №3, 1980, с. 27-29.
 16. **Залесов А.С., Гунтарь В.А., Чижевский В.В.** Краевое продавливание. // Бетон и железобетон, №2, 1990, с. 36-38.
 17. **Клованич С.Ф., Шеховцов В.И.** Продавливание железобетонных плит. Натурный и численный эксперименты. – Одесса: ОНМУ, 2011. – 119 с.
 18. Свод правил СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Минрегион России. – 2012. – 156 с.
 19. **Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Трекин Н.Н.** Расчет железобетонных конструкций из тяжелого бетона по прочности, трещиностойкости и деформациям. – М.: АСВ, 2011. – 352 с.
 20. **Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А.** SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++. – М.: СКАД СОФТ, 2015. – 808 с.
- 129337, Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 26; Тел. +7 (495) 287-49-14 доб. 3036, 3084; E-mail: ovk531@gmail.com.
- Песин Кирилл Олегович, инженер, ООО «МонолитСтройПроект»; 109386, Россия, г. Москва, ул. Краснодарская, дом. 19 корпус. 2, этаж 1, пом. II, комн. 9,12; E-mail: pesinkirill@rambler.ru.
- Карлин Алексей Владимирович, инженер, ООО «МонолитСтройПроект»; 109386, Россия, г. Москва, ул. Краснодарская, дом. 19 корпус. 2, этаж 1, пом. II, комн. 9,12; E-mail: karlinmsp@gmail.com
- Oleg V. Kabantsev. Professor, Dr.Sc., Professor of Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; National Research Moscow State University of Civil Engineering; 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia; Phone . +7 (495) 287-49-14 add 3036, 3084; E-mail: ovk531@gmail.com.
- Kirill O. Pesin, Engineer, Engineer, “MonolitStroyProekt” LTD; 19/2, ul. Krasnodonskaya, Moscow, 109386, Russia; E-mail: pesinkirill@rambler.ru.
- Alexey V. Karlin, Engineer, “MonolitStroyProekt” LTD; 19/2, ul. Krasnodonskaya, Moscow, 109386, Russia; E-mail: karlinmsp@gmail.com.

Кабанцев Олег Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет;